

電子ビームによる金型の表面改質に関する研究

— 電子ビーム照射による TiC 成分の拡散効果について —

萩原義人・佐野正明・古屋雅章・星野昌子

Study on Treating Surface of Molding Die by Electron Beam Irradiation

— Diffusion Effect of Titanium Ingredient by Electron Beam Irradiation —

Yoshihito HAGIHARA, Masaaki SANNO, Masaaki FURUYA and Shoko HOSHINO

要 約

近年、金型の表面処理において各種手法が用いられているが、その効果は一長一短である。そこで本研究では、表面被膜と拡散層の複合形成による金型表面の性能向上を目的として、被膜形成用の TiC 電極を用いた放電表面処理面に、硬化層の内部拡散を目的とした電子ビームを照射した試験片に対し、各種評価を行った。

その結果、放電表面処理による表面（約 10~20 μm ）への TiC の形成と、電子ビーム照射による TiC 成分の内部（約 50 μm ）への拡散を確認することができた。また、放電表面処理後の断面の硬さは、TiC が存在する加工変質層内において母材に比べ約 2 倍という高い硬さの値を示すとともに、EB 断面においても、TiC が拡散した約 50 μm までの溶融層内で 800HV 以上の高い硬さを示した。以上のことから、放電表面処理と電子ビーム照射の複合処理法を用いることで金型の性能向上に期待できる結果を得ることが出来た。

1. 緒 言

金型には、プレス金型、プラスチック金型、ダイカスト金型など多くの種類があるが、要求される性能が様々であることから、各種金型へ適用される表面処理も多岐にわたっている。現在の表面処理法としては、窒化処理に代表される拡散処理法や硬質クロムメッキ、無電解ニッケルメッキ、PVD (Physical Vapor Deposition), CVD (Chemical Vapor Deposition) 等に代表される被覆処理法がある。ダイカスト金型においても、耐熱疲労強度、耐溶損性、耐摩耗性、離型性等が求められることから、上記の各表面処理が活用されているが、その効果には一長一短がある¹⁾²⁾。そのため、ダイカスト金型のさらなる性能向上実現のために、表面被膜の形成と拡散硬化層の形成という複合処理法が要望されているが、複合処理面の形成は、非常に高度で困難な技術となっている。

そこで本研究では、被膜および硬化層形成用の電極を用いて放電表面処理³⁾した加工面に、電子ビームを照射することで、内部への拡散層を得るといった新たな表面改質法について検討する。これにより、表面被膜と拡散硬化層の複合形成を実現し、金型表面の性能向上を図ることを目的として各種検討を行った。

2. 実験方法

2-1 試験片素材

実験には、ダイカスト金型材料として広く活用されている熱間金型用合金工具鋼 (SKD61, 50HRC) 改良材を用いた。試験片素材の組成を表 1 に示す。

表 1 試験片組成 (重量%)

	C	Cr	Mo	V	Si	Mn
SKD61	0.3	5.0	2.3	0.6	0.2	0.5

2-2 試験片形状

実験に用いた試験片を図 1 に示すが、評価試験片には、10×10×10mm の立方体形状を用いた。

2-3 加工条件および処理条件

実験には金型の形状加工を想定した放電加工 (EDM) を切削加工 (CUT) 面に対し施した後、表面皮膜形成用の放電表面処理 (EDC), 拡散層形成用として電子ビーム (EB) 照射を施した。

放電加工は、電極に銅 ($\phi 60\text{mm}$) を用い、灯油加工液中で、電極極性を (+) とし、表 2 の条件で加工を行った。実験に用いた形彫放電加工機は、三菱電機 (株) 製 V25F-G35 である。

また、放電表面処理は、図 2 に示すような円柱状の TiC ($\phi 18\text{mm}$) 電極を用いて加工を行った。実験に用いた加工機は、三菱電機 (株) 製 EDSCAN8E である。

電子ビーム照射は、走査線間隔を一定とし、ビーム

電流と送り速度を変化させ、表 3 に示す条件で加工を行った。実験に用いた電子ビーム加工機は、三菱電機製 e-Flush である。

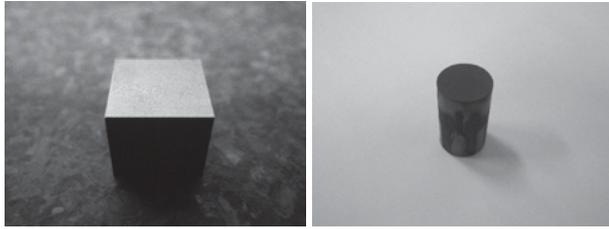


図 1 評価試験片

図 2 TiC 電極

表 2 放電加工条件

放電電流 i_e (A)	パルス幅 t_e (μ s)	休止時間 t_0 (μ s)
2.5	5.4	5.4

表 3 電子ビーム照射条件

加工条件	ビーム電流 (mA)	走査線間隔 (mm)	送り速度 (mm/min)
EB1	0.6	0.04	1000
EB2	0.6		2000
EB3	0.6		3000
EB4	0.8		1000
EB5	0.8		2000
EB6	0.8		3000
EB7	1.0		1000
EB8	1.0		2000
EB9	1.0		3000

3. 結果および考察

3-1 表面あらしの測定

各試験片表面の表面あらしの測定結果について、各 EB 条件ごとの測定結果を図 3 に示す。測定には、表面粗さ輪郭形状測定機（小坂研究所 Surfcomer DSF1000 型）を用いた。

CUT 面に EDM を施すことで、EDM に起因するさまざまな形状のクレータやクラックの存在が認められた。同加工面に EDC を施した場合、全体的には平滑化されたような面状態が形成されていたが、EDC 特有の TiC 電極成分の堆積加工⁴⁾により部分的に大きな凹凸が形成されていることが確認できた。さらに EB5 の条件で EB を照射した場合、EDC で生じた大きな凹凸は EB 加工による表面熔融で消失し、平滑な加工面が得られることが確認できた。

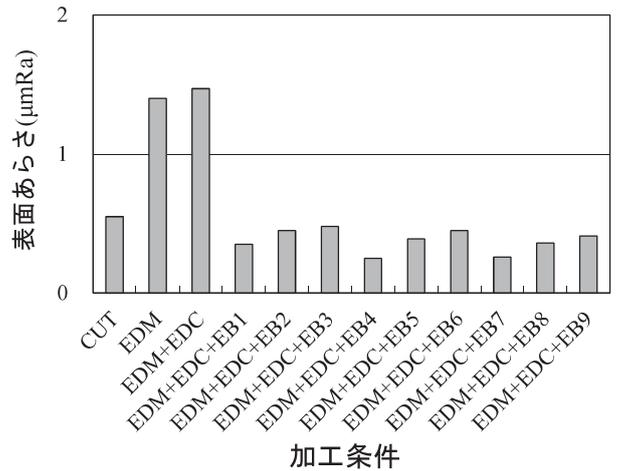


図 3 表面あらし測定結果

3-2 SEM 観察

図 4 に各試験片表面の走査型電子顕微鏡（SEM）による観察結果を示す。観察には、低真空型走査電子顕微鏡（日本電子 JSM-5310LV）を用いた。

CUT 面に EDM を施すことで、EDM に起因するさまざまな形状のクレータやクラックの存在が認められた。同加工面に EDC を施した場合、全体的には平滑化されたような面状態が形成されていたが、EDC 特有の TiC 電極成分の堆積加工⁴⁾により部分的に大きな凹凸が形成されていることが確認できた。さらに EB5 の条件で EB を照射した場合、EDC で生じた大きな凹凸は EB 加工による表面熔融で消失し、平滑な加工面が得られることが確認できた。

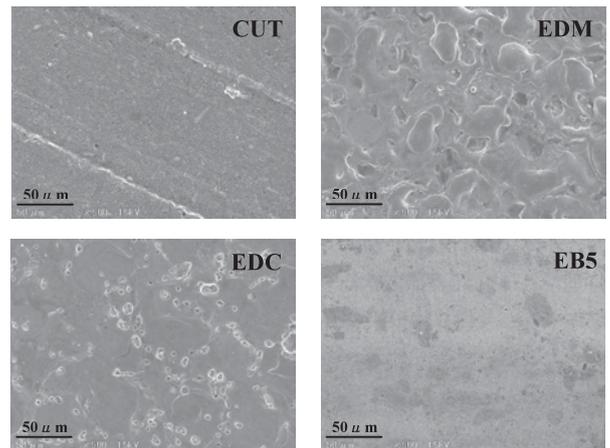


図 4 SEM 観察結果

3-3 蛍光 X 線による分析

図 5 に各試験片表面の蛍光 X 線による分析結果を示す。分析には、蛍光エックス線分析装置（エスアイイナノテクノロジー SEA1200VX）を用いた。

CUT 面および EDM 面からは、母材成分のみが検出

されたが、EDC 面からは、電極成分の Ti が検出された。また、EB 面からも Ti 成分が検出されたことから EB5 照射後も EDC 時に形成された Ti 成分が残存することが確認できた。

3-4 X線回折分析

蛍光 X線分析により、EDC 面と EB5 面に Ti が存在していることが確認できたため、さらに表面組成について詳しく調べるために各試験片表面の X線回折分析を行った。その結果を図 6 に示す。分析には、X線回折装置（リガク SmartLab）を用いた。

EDC 面には、CUT 面および EDM 面では確認できなかった TiC の回折ピークが認められたことから、EDC 時に表面に TiC の皮膜が形成されたことが確認できた。また、EB 面からも TiC の回折ピークが認められたことから、EDC 時に形成された TiC が表面に残存することが確認できた。

3-5 残留応力測定

図 7 に各試験片表面の残留応力測定結果を示す。測定には、微小部 X線応力測定装置（リガク AutoMATE）を用いた。

CUT 面に EDM を施すことで約 600MPa という高い残留応力（引張応力）値を示したが、EDM 面に EDC を施すことで残留応力値は 1/3 まで低下することが確認できた。さらに EDC 面に EB5 を照射した場合、ほとんどの EB 条件において残留応力が引張応力から圧縮応力側へ移行することが確認でき、EDC+EB 面ではクラック発生の抑制効果が期待できる結果となった。また EB 条件ごとに比較すると、ビーム電流値が大きいほど、送り速度が遅いほど、強い圧縮応力に移行する傾向を示すことが確認できた。

3-6 顕微鏡による断面観察

図 8 に各試験片断面の金属顕微鏡による断面観察結果を示す。測定には、金属顕微鏡（ニコン ECLIPSE MA200）を用いた。

EDM 後の最表面には、約 5~10μm 程度の不均一な厚さでクラックを含む加工変質層が認められた。その EDM 面に EDC を施すと、SEM 観察でも確認されたより大きな凹凸形状を含む約 10~20μm 程度の 2 層から形成される断面層が認められた。この断面層は EDM 時に形成された加工変質層と EDC 時にその上面に堆積された加工層（堆積加工層）からなる断面層と考えられる。しかし、EDC 面に EB5 の条件で EB を照射すると、最表面の大きな凹凸の消失、つまり平滑化を確認することが出来たとともに、約 50μm の熔融層とその直下に EB 照射時の熱影響により生じたと思われる約 70μm の熱影響層の形成が確認で

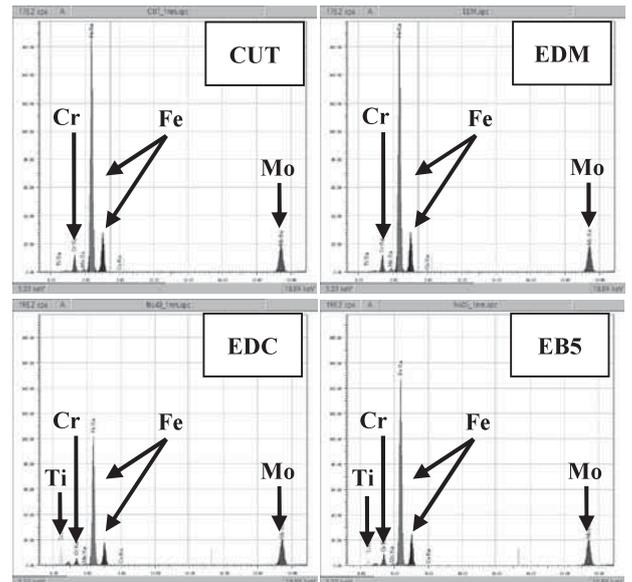


図 5 各試験片の蛍光 X線分析結果

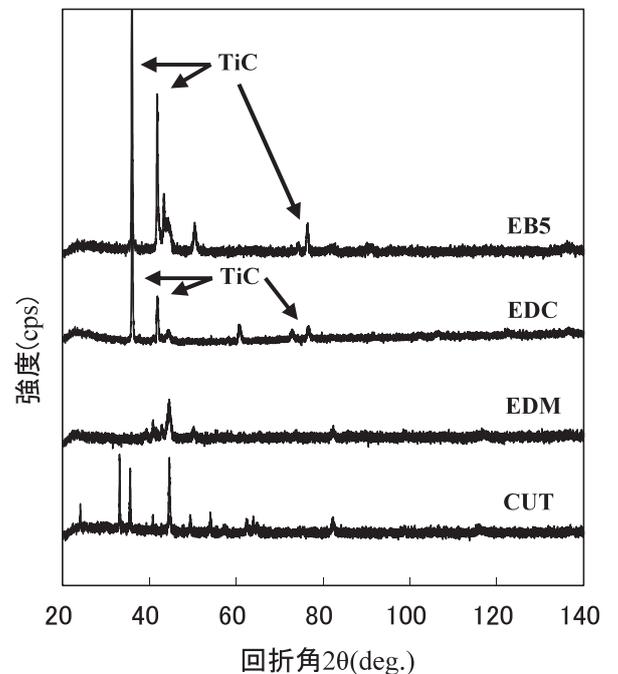


図 6 各試験片の X線回折分析結果

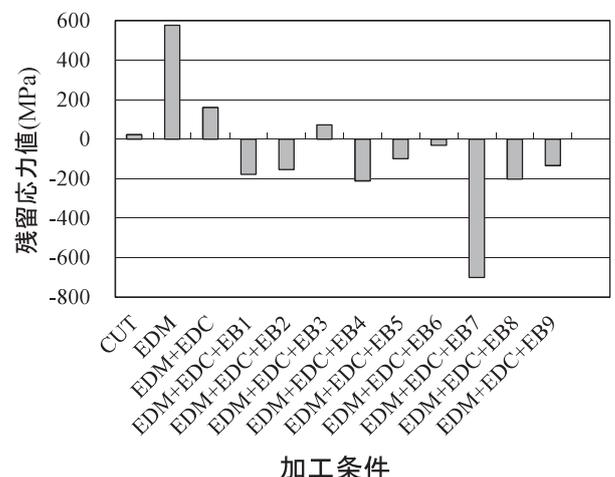


図 7 各試験片の残留応力測定結果

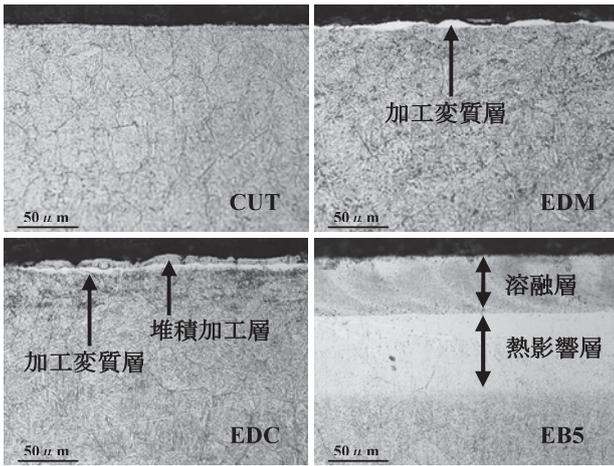


図8 各試験片断面の観察結果

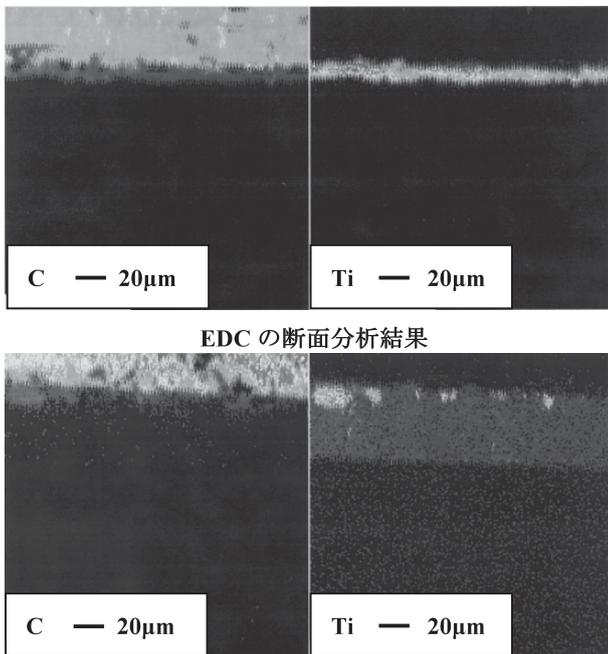


図9 各試験片の断面分析結果

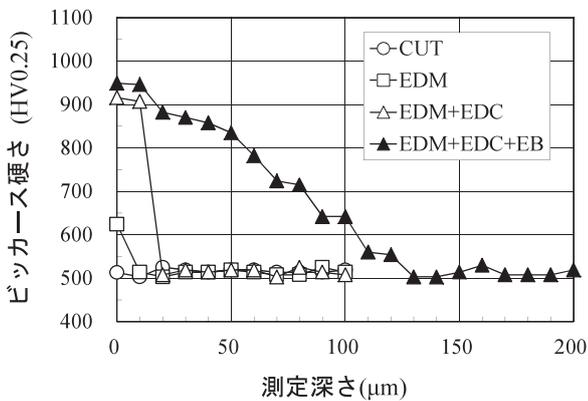


図10 各試験片断面の硬さ測定結果

きた。

3-7 断面のマッピング分析

図9にEDC断面とEB断面のC成分とTi成分のマッピング分析の結果を示す。分析には、WD/ED コンバイン・マイクロアナライザー（日本電子 JXA-8900RL）を用いた。

EDC後の最表面には、EDC時に形成された約10～20μmの加工変質層にCとTiが存在していることが確認できた。そのEDC面にEB5の条件でEBを照射すると、EDCで形成されたTiC成分が約50μmのEB熔融層内部にまで拡散していることが確認できた。

3-8 断面の硬さ測定

図10に各試験片断面の硬さの測定結果を示す。測定には、微小硬度計（アカシ MVK-G3500AT）を用いた。

EDM試験片は、加工変質層の形成により、最表面のみ母材より硬くなる結果を示した。またEDM面にEDCを施すことで最表面に形成されたTiCが存在する堆積加工および加工変質層内において母材に比べ約2倍という高い硬さの値を示した。また、EDC面にEBを照射した場合、TiCが拡散した約50μmまでの熔融層内で800HV以上の高い硬さを示し、それ以降約120μmまでの熱影響層内において母材より高い硬さ値を示すことが確認できた。EB照射断面の熔融層内ならびに熱影響層内における硬さの変化は、熔融層内はTiおよびCの拡散濃度の影響、熱影響層内はEB照射時の熱的影響によるものだと考えられる。

4. 結言

金型表面の性能向上を目的として、被膜形成用のTiC電極を用いた放電表面処理面に、硬化層の内部拡散を目的とした電子ビームを照射した試験片に対し、各種評価を行った結果、以下のことが確認できた。

- 1) 各試験片の表面あらさ値を比較したところ、ビーム電流値が大きいほど、送り速度が遅いほど表面あらさが向上するという結果が得られた。
- 2) 各試験片のSEM観察結果より、EDCを施すと、部分的に大きな凹凸が形成されることが確認できた。また同加工面にEBを照射した場合、EDCで生じた大きな凹凸は消失し、平滑な加工面が得られることが確認できた。
- 3) EDC面には、EDC時に表面に形成されたTiCの回折ピークが認められた。また、EB面からもTiCの回折ピークが認められたことから、EDC時に形成されたTiCが表面に残存することが確認できた。
- 4) EDM面にEDCを施すことで残留応力値の低下を

確認することができた。さらに EDC 面に EB を照射した場合、圧縮応力側へ移行することが確認できた。

5) EDM 面に EDC を施すと、約 10~20 μm 程度の加工変質層と堆積加工層の形成が認められた。さらに EDC 面に EB を照射すると、約 50 μm の熔融層とその直下に約 70 μm の熱影響層の形成が認められた。

6) EDC 後の最表面には、C と Ti が存在していることが確認できた。また EDC 面に EB を照射することで、EDC で形成された TiC 成分が約 50 μm の EB 熔融層内部に拡散していることが確認できた。

7) EDC 断面の硬さは、TiC が存在する加工変質層内において母材に比べ約 2 倍という高い硬さの値を示した。さらに EDC 面に EB を照射した場合、TiC が拡散した約 50 μm までの熔融層内で 800HV 以上の高い硬さを示した。

以上のことから、放電表面処理と電子ビーム照射の複合処理法を用いることで金型の性能向上に期待できる結果を得ることが出来た。

参考文献

- 1) 河田一喜：最近の表面処理技術の動向，電気製鋼，第 76 巻 4 号，P.269-277(2005)
- 2) 河田一喜：ダイカスト金型表面処理の最新動向，素形材，Vol.49 No.2，P.11-17(2008)
- 3) 毛利尚武，齋藤長男，恒川好樹，初山英教，宮川昭彦：放電加工による表面処理—複合構造体電極法—，精密工学会誌，59，P.625-630(1993)
- 4) 毛呂俊夫，後藤昭弘，齋藤長男，毛利尚武：放電表面処理（EDC）被膜の形成メカニズム，型技術，第 15 巻 8 号，P.140(2000)